荔枝果皮採後褐化的生理機制與抑制策略：近年研究彙整

邱國棟 [1,3]、徐敏記 [2]、林沛儒 [2]、梁佑慎 [3*]

1 農業部農業試驗所鳳山熱帶園藝試驗分所果樹系
2 農業部農業試驗所作物組
3 國立屏東科技大學 農園生產系
*聯繫人 e-mail: justinliang@mail.npust.edu.tw

荔枝(*Litchi chinensis*)爲臺灣重要經濟果樹之一，然其採收後果皮極易發生褐變，嚴重影響商品價值與外銷競爭力。本文綜整近年研究，探討荔枝果皮褐化之生理機制與抑制策略。褐變本質爲酵素性氧化反應，主要由多酚氧化酶(polyphenol oxidase)與過氧化物酶(peroxidase)催化酚類物質生成醌類並聚合爲褐色物質，其發生與細胞膜完整性密切相關。採後失水、冷害與老化會導致膜結構破壞，使酵素與底物接觸並啓動褐變反應。此外，花青素降解、活性氧(reactive oxygen species)累積與抗氧化能力下降亦會加速褐變進程，而能量代謝失衡則進一步惡化細胞生理狀態。影響褐變之主要因素包括水分散失、果實老化、低溫傷害、機械損傷與病原菌感染，且彼此具有交互作用。近年保鮮技術發展以維持細胞膜穩定爲核心，包括可食性塗層、化學處理(如水楊酸、草酸等)、預冷技術與氣變包裝(modified atmosphere packaging)，皆能有效延緩褐變並維持品質。臺灣實務上則強調快速預冷、高濕環境及冷鏈整合，以確保採後品質穩定。未來應整合生理機制研究與產業應用，發展更安全、高效且永續之荔枝保鮮技術。

關鍵字：褐化、失水、多酚氧化酶、活性氧、膜穩定性、氣變包裝、採後保鮮

引言

荔枝(*Litchi chinensis*)爲臺灣重要的經濟果樹之一，近年荔枝栽培面積逐漸下降，104 年臺灣荔枝栽培面積統積資料顯示仍有超過 1 萬公頃，但根據 113 年臺灣農業統計年報資料顯示，全台荔枝栽培面積 9,534 公頃，總產量爲 45,137 公噸，主要產區爲高雄市(3,037 公頃)、台中市(1,785 公頃)、南投縣(1,322 公頃)、嘉義縣(926 公頃)、彰化縣(876 公頃)、台南市(815 公頃)、屏東縣(470 公頃)等(農業部，2026a)。由於環境氣候變遷、農業生產缺工和老齡化等因素，造成荔枝生產面積與總產量逐漸下降。與此同是，荔枝生產過程中，不穩定的產量同時影響外銷量的變化，近 10 年的荔枝外銷量同樣隨著荔枝總產量的變化逐漸下降，114 年外銷量約 119 公噸、外銷總值約 1,398 千美金，主要出口國家爲日本(102 公噸)、紐西蘭(7 公噸)、香港(5 公噸)、澳大利亞(3 公噸)(農業部，2026b)。

荔枝果實採收後果皮容易褐變是影響消費者購買與外銷品質迅速劣變的主因。古有云:「荔枝果實一日色變，二日味變，三日色香味盡失矣!」以此形容荔枝採收後品質的快速劣變，造成荔枝貯運與遠程外銷枝困難，若無良好的採後處理作業與冷鏈物流作業串接，難以穩定外銷供應。荔枝果實採收後因其果皮與果肉的結構特性，造成荔枝外果皮極容易失水，且因產期主要於夏季高溫期，使果實採收時累積高量的田間熱與呼吸熱，同時強烈的蒸散作用都造成外果皮快速失水，進一步使果皮細胞膜損傷，胞器失去分隔化，使細胞內的花青素或多酚類物質與褐化酵素反應，最終造成果皮的褐化反應失去外觀品質(Huang et al., 2024)。此外，果實採收後因微生物引起的果皮褐變也是造成貯運過程果實損耗的主因之一，由於荔枝果皮容易失水，因此在採後處理與貯運過程中須維持較高的相對濕度，但這同時也爲微生物提供更多的水分利用，使微生物得以快速增加生長，引起果實褐化與腐損的發生。

荔枝果實採收後面對許多生理與環境的不良影響，導致荔枝收後品質容易劣變，降低貯運壽命。由於良好的荔枝採收後處理作業對荔枝果實採後保鮮與褐化控制極爲重要，近 20 年有許多關於荔枝果皮褐化與採後處理保鮮作業的相關綜合論述文章與相關研究發表，故本文即針對荔枝果實採收後腐損與褐化之原因進行說明，並針對近年相關荔枝採後保鮮技術的開發研究與臺灣荔枝採後處理作業現況進行說明，以供相關學術研究與產業應用參考。

荔枝果皮褐化生理機制

荔枝果皮褐化是一個多層次且相互關聯的生理過程，其本質爲酵素性氧化反應，但其發生受到細胞膜完整性、抗氧化系統與能量代謝等多重因素調控(Holcroft and Mitcham, 1996; Huang et al., 2024; Jiang et al., 2004; Marboh et al., 2017)。

1.　細胞膜完整性與區室化破壞

細胞膜在荔枝果皮褐變中具有關鍵調控角色。正常情況下，褐化酵素(如 polyphenol oxidase, PPO)與底物(酚類)分別存在於不同細胞區室中(如質體與液胞)，彼此隔離(Jiang et al., 2004)。然而當細胞膜受損時，區室化結構破壞，使酵素與底物接觸，啓動氧化反應(Liu et al., 2011)。膜損傷的主要表現爲「細胞滲漏增加」，此現象常早於可見褐變發生(Huang et al., 2005)。例如在低溫貯藏或高溫環境下，膜通透性增加，即使尚未出現褐變，

細胞已處於不穩定狀態。此外，膜脂降解相關酵素(如 phospholipase D、lipoxygenase)活性增加，也會破壞膜結構，使細胞更易發生褐變。因此，細胞膜的完整性可視爲「褐變發生的門檻」，一旦失去穩定性，即會啓動後續酵素反應(Huang et al., 2024)。

2. 酵素性氧化反應機制

荔枝果皮褐化的核心機制主要爲酵素性氧化反應，其中以多酚氧化酶(PPO)最爲關鍵(Huang et al., 2024)。這些酵素能催化果皮中多酚類物質(如兒茶酚、表兒茶素等)氧化，產生醌類物質，進一步聚合形成褐色色素(Jiang et al., 2004; Huang et al., 2024)。研究指出，在褐變過程中，酚類、類黃酮及花青素含量會顯著下降，而 PPO 活性則於初期快速上升，顯示其在褐變初期扮演啓動角色。PPO 的底物主要爲雙酚類，而非單酚類，其中(-)-表兒茶素被證實爲重要底物(Sue et al., 2010)。隨著褐變進程，其含量逐漸降低，顯示其被持續氧化消耗(Yang et al., 2011)。此外，PPO 活性受環境條件影響顯著，例如在中性偏酸環境(pH 約 6.8)活性最高，而低 pH 可抑制其活性，亦解釋酸處理可延緩褐變的原因()。除了 PPO 外，POD 亦參與褐變反應，其活性通常隨貯藏時間延長而增加，並與花青素含量呈負相關。過氧化物酶(peroxidase, POD)可利用過氧化氫(H_2O_2)作爲氧化劑，催化酚類與花青素降解，形成褐色物質。兩者之間可能透過「耦合氧化反應」共同作用，加速褐變進程(Zhang et al., 2005)。

體而言，酵素性氧化反應是荔枝果皮褐化的直接原因，而 PPO 與 POD 的活性變化與褐變程度高度相關(Jiang et al., 2004)。

3. 花青素降解與相關酵素作用

荔枝果皮鮮紅色主要來自花青素，其穩定性直接影響外觀品質。花青素的降解是褐化的重要前驅過程，涉及多種酵素，包括花青素酶(anthocyanase, ANT)與漆酶(laccase, LAC)。ANT 可將花青素水解爲花青素苷元，該物質極不穩定，容易進一步轉化爲無色或被氧化物質，進而失去紅色。這些產物可被 PPO 再次氧化，形成褐色物質，因此 ANT 在褐變中扮演「前處理」角色(Zhang et al., 2001)。另一方面，LAC 亦被證實爲重要的花青素降解酵素，其活性甚至可能高於 PPO。LAC 存在於液胞中，與酚類底物共存，能透過與表兒茶素的耦合氧化反應，促進花青素降解。研究指出，花青素降解與表兒茶素含量變化具有一致性，顯示兩者間具有密切關聯(Zhang et al., 2003)。

此外，不同品種間褐變差異亦與這些酵素活性相關。例如易褐變品種通常具有較高的 ANT、PPO 與 POD 活性，而抗褐變品種則相對較低(Zhang et al., 2015)。因此，花青素降解與相關酵素作用，是由「色素消失」轉變爲「褐色形成」的關鍵橋樑。

4. 抗氧化系統與活性氧(reactive oxygen species, ROS)累積

荔枝果皮的抗氧化能力對於抑制褐變具有重要作用。抗氧化系統包括非酵素成分(如花青素、酚類、抗壞血酸)與酵素系統(如 superoxide dismutase, SOD、Catalase, CAT、ascorbate peroxidase, APX)(Jiang et al., 2004)。在採收後，果皮抗氧化能力逐漸下降，導致 ROS(如 H_2O_2、超氧陰離子等)累積。這些 ROS 會引發脂質過氧化，造成膜損傷，進一步促進褐變反應(Duan et al., 2011)。此外，抗氧化物質的消耗亦會加速褐變。例如抗壞血酸(ascorbic acid, AsA)能抑制酚類氧化，但當其耗盡後，氧化反應迅速進行。AsA 含量與褐變程度呈負相關。水分散失亦會降低抗氧化能力，並促進 ROS 累積與膜滲漏增加

(Jiang, 2000)。不同品種間抗氧化能力差異，也影響其褐變速率。整體而言，當抗氧化系統失衡時，氧化壓力增加，將加速褐變的發生。

5. 能量代謝與細胞生理失衡

細胞能量狀態是維持膜穩定與抑制褐變的重要因素。能量狀態通常以 ATP 含量與腺苷酸能量電荷(Adenylate Energy Charge, AEC)表示。在貯藏過程中，若 ATP 含量下降，會導致：膜穩定性降低、酵素調控失衡、活性氧增加。當能量不足時，果實可能出現呼吸突增現象，以補充能量，但同時也會產生更多 ROS，形成惡性循環(Liu et al., 2011; Yun et al., 2016)。研究指出，維持較高 ATP 與 AEC 水平可有效延緩褐變，並抑制膜滲漏與脂質過氧化。此外，能量代謝相關酵素(如 ATPase、cytochrome C oxidase, CCO)活性與褐變程度亦密切相關(Li et al., 2020; Zhang et al., 2017)。若能量供應不足，將導致細胞提前老化，促進褐變與腐敗發生。

荔枝果皮褐化並非單一因素所致，而是多種生理機制交互作用的結果。其發生過程可概括如下：

- 採後失水、低溫或逆境 → 細胞膜受損
- 膜完整性下降 → 區室化破壞
- 酵素(PPO、POD)與底物接觸 → 氧化反應啓動
- 花青素降解 → 顏色消失
- 酚類氧化 → 褐色物質形成
- 抗氧化能力下降 + ROS 累積 → 加速反應
- 能量不足 → 加劇膜損傷與褐變

上述過程形成一個高度複雜的生理網絡，其中「膜穩定性」、「酵素活性」、「抗氧化能力」與「能量狀態」爲四大核心調控因子。

荔枝採收後引起果皮褐化的因素

荔枝爲典型高經濟價值之亞熱帶果實，然而其採後貯藏壽命極短，果皮極易由鮮紅轉爲褐色，嚴重影響商品價值與市場接受度。果皮褐變屬於複雜之生理與生化反應結果，涉及細胞膜完整性破壞、酵素活化與氧化反應等過程。綜合研究顯示，水分散失、果實老化、冷害、機械損傷及病害感染爲主要誘發因子，且彼此之間具有交互作用關係，共同加速褐變發生。

1. 水分散失(Water loss)—褐變之關鍵驅動因子

水分散失被普遍認爲是荔枝果皮褐變最重要的誘發因子之一，其影響不僅限於外觀乾燥，更直接觸發細胞層級之生理變化(Holcroft and Mitcham, 1996; Huang et al., 2024; Marboh et al., 2017)。

首先，當果皮水分降低時，會導致細胞膜結構破壞，使原本區隔於液胞與細胞質中的酵素與底物發生接觸(Wang et al., 2010)。例如，PPO、POD 與酚類物質接觸後，迅速產生氧化反應，生成褐色聚合物(o-quinones)，形成可見褐變現象(Xiao et al., 2019)。其次，水分散失會改變果皮 pH 值。隨著脫水進行，果皮 pH 由約 4.1 上升至 4.5 以上，使花青素穩定性降低並轉爲無色或褐色形式，進一步促進褐變發生(Joas et al., 2005)。此外，水分散失呈現雙相模式：採收初期快速失水主要來自果皮，而後期則轉爲較慢的內部水

分流失。早期研究顯示，採收 24 小時內果實總重僅減少約 8%，但果皮重量卻可下降達 43%，顯示果皮對水分流失極為敏感(Underhill and Simons, 1993)。環境條件亦對水分散失具有決定性影響。低相對濕度(如 60% RH)會顯著加速褐變，而高濕度(95–100% RH)則可有效維持果皮紅色並降低褐變程度(Vilasachandran and Sargent, 1997)。因此，水分散失不僅為物理現象，更是誘發氧化反應與細胞結構崩解之關鍵起點。

2. 果實老化(Senescence)—內在生理劣變機制

荔枝屬於非更年型果實，採收後無後熟能力，隨時間推移即進入不可逆之老化過程。此過程與褐變密切相關，主要透過細胞膜劣化與氧化壓力增加所驅動(Huang et al., 2005)。在採收後數日內，果皮細胞膜滲漏率迅速上升，導致電解質外流及細胞區隔化破壞(Wang et al., 2010)。此現象使液胞內花青素與細胞質中氧化酵素接觸，進一步促進褐變反應。同時，老化過程伴隨活性氧(ROS)累積與脂質過氧化反應增加，指標物質如丙二醛(malondialdehyde, MDA)與 H_2O_2含量上升，顯示細胞膜遭受氧化傷害(Underhill et al., 1992)。此外，抗氧化系統(如 SOD、CAT、APX)活性逐漸下降，使細胞無法有效清除自由基，進一步加速褐變。

在基因層級，研究亦指出老化初期會啓動逆境反應相關基因，而進入褐變階段後，則轉為細胞壁降解與氧化反應相關基因的上調表現，顯示褐變為老化後期的重要表徵(Zhou et al., 2020)。

3. 冷害(Chilling injury)—低溫逆境誘發之褐變

荔枝為亞熱帶果實，對低溫極為敏感，當貯藏溫度過低(如 0-3°C)時，容易產生冷害現象，並伴隨果皮褐變(Huang et al., 2024)。冷害的主要機制在於低溫破壞細胞膜脂質結構，使膜流動性下降，進而導致膜滲漏與代謝失衡。在 0°C 貯藏 14-21 天後，荔枝果皮滲漏率顯著上升，並伴隨花青素與酚類物質快速下降(Hu et al., 2004 and 2006)。此外，冷害會促進 LOX 活性增加，加速膜脂氧化與降解，進一步破壞細胞結構(Liu et al., 2005)。同時，抗氧化酵素活性下降，使果實對氧化壓力的抵抗能力降低(Liu et al., 2005; Hu et al., 2006)。值得注意的是，冷害與水分散失具有交互作用。例如低溫貯藏後轉至常溫時，細胞膜滲漏會急劇增加，導致褐變快速發生，顯示溫度波動亦為重要影響因子。

4. 機械性損傷(Mechanical injury)—誘發褐變與腐敗之起點

機械損傷為採收與運輸過程中常見之問題，對荔枝果皮品質具有顯著影響。果實在採收、搬運或包裝過程中，因碰撞、摩擦或跌落，會造成果皮角質層破裂與微裂紋形成。這些微裂紋不僅增加水分散失速率，也使中果皮中的花青素暴露於氧氣環境，加速氧化反應 。此外，機械損傷會誘導乙烯生成與呼吸速率上升，進一步促進老化與褐變。即使輕微損傷亦可在 1–4 天內明顯增加褐變程度，並改變果實風味品質(Xu et al., 2020)。此外，損傷部位常成為病原菌侵入的入口，使褐變與腐敗同步發生。

5. 病害感染(Pathogen infection)—褐變與腐敗的加速因子

荔枝果實在採收時即可能帶有潛伏性病原菌(Kumar et al., 2025)，尤其是炭疽病菌(*Colletotrichum* spp.)。Li et al. (2005)的研究指出，約 65–90%的果實在採收時已存在潛伏感染。當果實進入貯藏或運輸階段，隨著細胞膜受損與水分流失，病原菌迅速繁殖，

產生酵素分解細胞組織，導致水浸狀褐斑與腐敗現象。此外，高濕度環境雖可降低水分散失，但亦可能促進真菌生長，使褐變與腐敗問題更加嚴重。因此，病害常與其他因素(如機械損傷與高濕度)共同作用，形成複合性劣變(Kumar and Anal, 2021)。

荔枝果皮採後褐變爲多因子交互作用之結果，其中以水分散失爲主要驅動因子，而老化、冷害、機械損傷與病害則爲重要促進因子。這些因素最終皆透過破壞細胞膜完整性，促使酵素性氧化反應發生，導致花青素降解與褐變產生。因此，在實際採後管理中，應以「維持細胞膜完整性」爲核心策略，透過控制濕度、適當低溫貯藏、減少機械損傷及病害控制等綜合措施，方能有效延緩荔枝果皮褐變並延長貯藏壽命。

近年研究方向與發展

1. 覆膜塗層(coating)

蔬果塗層處理(edible coating)係於果實表面形成一層由多醣、蛋白質或脂質構成之可食性薄膜，其核心原理在於建立「半透性屏障」，以調控水分與氣體交換。此類塗層可降低水分蒸散與氧氣滲透，進而抑制呼吸速率與延緩成熟，同時減少乙烯作用對後熟與老化之影響。此外，部分塗層材料(如幾丁聚醣)具天然抗菌與抗氧化特性，可抑制病原菌生長並降低活性氧(ROS)累積，維持細胞膜完整性與品質穩定。塗層技術可有效延緩果實軟化、褐變與營養流失，進而延長貯藏壽命。實務上廣泛應用於草莓、芒果、番茄及鮮切蔬果等，並常與冷鏈或氣調貯藏結合，以提升保鮮效果與商品價值，爲現代採後處理重要技術之一(Alemu et al., 2025; Dai et al., 2025)。

Kumar et al. (2024)利用可食性水膠體在常溫貯藏條件(溫度 27°C、相對濕度 82 %)下抑制荔枝果皮褐變及延長貯藏壽命之效果。可食性塗膜材料，包括羧甲基纖維素(carboxymethyl cellulose, CMC)、甲基纖維素(methylcellulose, MC)與阿拉伯膠(acacia gum, AG)，皆可在常溫條件下延長荔枝的貯藏壽命並維持採後品質。其中以 CMC 處理效果最爲顯著，在 7 天常溫貯藏期間，相較於未處理果實，其可溶性固形物(約 65%)、可滴定酸(約 42%)、抗壞血酸(約 24%)及總酚(約 40%)之保留率均較高。此外，CMC 處理亦顯著降低 PPO(約 25%)與 POD(約 28%)活性，同時延緩失重與腐敗發生。因此，CMC 塗膜可作爲一種環保且可替代化學保鮮劑的技術。Li et al. (2026a)利用高碘酸鈉氧化阿拉伯膠(oxidized gum arabic)和幾丁聚醣(chitosan)作爲成膜基材，並添加 ε-聚賴胺酸(ε-polylysine)與沒食子酸(gallic acid)，構建具協同增強效果的複合薄膜，顯著提升薄膜的緻密性、抗紫外線能力與穩定性；膜的水蒸氣透過率與氧氣透過率顯著降低。荔枝保鮮試驗證實，此薄膜在延緩營養流失與抑制微生物生長方面顯著優於傳統抑菌劑普克利(prochloraz)。

目前塗覆技術的應用材料除了基礎的腹膜材料，包括幾丁聚醣、海藻酸鈉、CMC、明膠(Gelatin)、乳清蛋白(Whey protein)、甘油等(Alemu et al., 2025; Dai et al., 2025)，亦會在塗層中添加可抑菌材料或具功能性的添加副材料等。Yang et al. (2023)利用柚子萃取物(pomelo extract)結合幾丁聚醣/檸檬酸塗層處理，評估荔枝(cv. Yu He Pao)冷藏後品質變化。其指出利用 1%幾丁聚醣配合 2%柚子萃取物塗層處理的荔枝果實於 5°C貯藏 14 天後回溫 20°C、3 天，可顯著降低果皮褐化(16.5%)、失重率(28.0%)與病害嚴重度(65.7%)，並延長果實貨架壽命至少 2 天，果實可售率仍有 73.3%。此外，Yu et al. (2024)利用硒奈米粒子(selenium nanoparticles, SeNPs)具有優異的抗氧化與抗菌特性，結合並利用多酚與多醣之間的交互作用來改善 SeNPs 的結構與生物活性，將其導入澱粉薄膜中，使材料同時具備抗氧化、抗菌與阻隔紫外線功能，以延長食品保存期限，並藉由自增強效應提

升材料機械強度，使其適用於食品包裝。利用含 SeNPs 澱粉薄膜可有效減少荔枝果實失水、防止營養流失、抑制微生物生長、維持荔枝品質並延長貯藏壽命。Zheng et al. (2026) 利用納他黴素(natamycin)混和羧甲基纖維素鈉與季銨鹽型幾丁聚醣形成穩定、無味且具廣效抗真菌活性之覆膜材料，有效抑制果實腐敗，對荔枝露疫病菌(*Peronophythora litchii*) 的抑制率高達 99.50%，並在常溫條件下將荔枝貯藏壽命延長至 7 天。

2. 化學處理

荔枝果實採收後貯藏前的化學處理主要目的在於穩定果皮花青素含量、提升果皮抗氧化能力、延緩果皮褐化，維持果實品質並抑制果實病害的發生。

植物生長激素/生長調節劑於荔枝果實採收後的應用包括水楊酸、茉莉酸、褪黑激素和乙烯等(Kumar et al., 2013; Xie et al., 2022; Deshi et al., 2022)。Siddiqui et al. (2024)將採收後的荔枝果實利用超音波震盪配合 2mM 水楊酸(salicylic acid)浸泡處理並將果實貯藏在室溫環境，可有效降低果實失重率、腐敗發生率及活性氧生成量。同時，此處理能維持較高的可溶性固形物、可滴定酸度、總酚含量、抗氧化能力及苯丙氨酸解氨酶活性，並顯著抑制多酚氧化酶活性。牡荊素(Vitexin，8-β-D-葡萄糖苷芹菜素)屬於類黃酮化合物，主要來源於山楂葉片及其他中藥材。採收後的荔枝果實利用 1mM 的牡荊素溶液浸泡 5 分鐘，貯藏在 25 °C 條件下，牡荊素處理可有效減緩荔枝果皮褐變。同時，牡荊素能抑制果皮中 ROS 的生成，並提升穀胱甘肽過氧化酶(glutathione peroxidase)活性，從而在氧化傷害中發揮保護作用。此外，牡荊素處理可透過調控 LcSnRK1 以及 LcbZIP1/3 的表現，減緩細胞內 ATP 含量的下降，維持細胞膜穩定。有研究指出，ethephon 處理可提升果皮抗氧化能力與病原防禦機制來抑制荔枝採後露疫病發生(Zhu et al., 2025)。採收後的荔枝果實利用 400 mg·L^{-1} ethephon 溶液浸泡 2 分鐘，可顯著抑制 *Peronophythora litchii* 感染，降低病害指數與果皮褐變指數，但會提升果實乙烯產生速率和多種關鍵抗氧化與防禦相關酵素活性。草酸(oxalic acid)具有作爲荔枝保鮮劑的潛力，採收後的荔枝果實利用 2 mM 草酸溶液浸泡 10 分鐘再進行貯藏，可有效延緩荔枝老化，降低 40%的褐變率、腐損率下降 64%，同時維持細胞膜完整性與粒線體結構。草酸處理亦提升 ATP/ADP 含量及能量代謝相關酵素(H^+-ATPase 與 Ca^{2+}-ATPase)活性，進而維持細胞結構並抑制荔枝褐變與老化(Li et al., 2026b)。

荔枝果實採收後爲減少果皮失水而維持相對高的相對濕度貯藏環境，進而造成果皮上的微生物更容易滋生導致果實腐損的發生。荔枝果實採收後的果皮抑菌處理也是採後保鮮的重要措施。微酸性電解水(slightly acidic electrolyzed water)被認爲是一種安全的消毒技術，不僅能維持採後農產品品質，亦可提升其抗病能力。根據 Jiang et al. (2025) 的研究指出，荔枝果實採收後利用 25 mg/L 有效氯濃度的微酸性電解水浸泡 5 分鐘，可顯著提升荔枝採後品質、降低病害發生率，並改善果皮外觀及果肉營養含量。同時，在貯藏後 3 天內，果皮中多種抗病相關酵素(disease resistance enzymes)活性顯著提高，包括苯丙氨酸解氨酶、肉桂酸-4-羥化酶、4-香豆酸輔酶 A 連接酶、肉桂醇脫氫酶、過氧化酶、多酚氧化酶、幾丁質酶及 β-1,3-葡聚醣酶。微酸性電解水可透過調控苯丙烷代謝途徑，誘導抗病酵素活性並促進抗病物質累積，從而抑制病害發展並提升荔枝貯藏品質。

利用天然植物萃取精油或有益微生物代謝物取代化學抑菌劑也是目前研究的方向之一。荔枝炭疽病(由 *Colletotrichum fructicola* 引起)是影響荔枝採後的重要病害之一。百里酚(thymol)對 *C. fructicola* 具有明顯的抑制效果。In vitro 試驗結果指出，百里酚可顯著抑制病原菌菌絲生長與孢子萌發。百里酚亦能提升荔枝果實中防禦相關酵素活性，顯示其可誘導宿主抗性(Chen et al., 2026)。此外，利用酵母菌 *Debaryomyces hansenii* Y-1 與細

菌 *Bacillus atrophaeus* TE-7 共培養之上清液浸泡荔枝果實，可透過調控苯丙烷代謝與 ROS 平衡，同時提升荔枝抗病性與抗氧化能力，有效延緩採後品質劣變，是極具潛力的天然生物保鮮技術(Li et al., 2026a)。

其他化學材料包括海藻糖(trehalose)、富氫水(hydrogen-rich water)、氧化鋅奈米粒子材料皆有研究報告指出具有荔枝採收後保鮮之效果(Liu et al., 2025; Gao et al., 2024a, b)。

3. 預冷(precooling)

臺灣荔枝果實的採收季在 5-7 月，果園白天溫度偏高，尤其在下午 1:00 至 3:00 間，田間溫度可高達 35°C，甚至更高。採收時，荔枝果實累積大量田間熱，進而促進生理反應。預冷是採後處理技術之一，用於去除新鮮農產品的田間熱，降低代謝速率，並限制貯藏期間的腐敗發生(Nowak and Mynett, 1985; Rudnucki et al., 1991)。「預冷溫度」是影響荔枝貯運物流品質的核心因子，結合保冷袋配置與隔熱設計，才能有效抑制褐變與品質劣變(Guo et al., 2025)。果實溫度預冷至 15°C與 5°C之果實於相同隔熱保冷袋包裝條件下，第二天時 15°C的果皮真菌生長速率較快，可達 3.87CFU/g。同時增加保冷袋數量則可顯著降低前兩天果實可溶性固形物的下降速率(Guo et al., 2025)。

預冷方法包括室內風冷(room cooling)、碎冰預冷(icing cooling)、水冷(hydrocooling)、強制風冷(forced-air cooling)及真空冷卻(vacuum cooling)(Brosnan and Sun, 2001)。Zeng et al. (2026)比較荔枝採收後利用冰水預冷與壓差預冷的影響。與強制風冷相比，冰水預冷可維持較佳的果皮色澤、較快的降溫速率、較高的果皮含水量及較佳的果實硬度。冰水預冷在維持外觀與水分上表現最佳，但壓差預冷(特別是約 10 m/s)在兼顧冷卻效率、品質維持與產業操作性上更具應用潛力，未來關鍵在於水分管理與包裝優化。

4. 氣變包裝(modified atmosphere packaging)

氣變包裝的核心概念，在於利用包裝薄膜對氧氣(O_2)、二氧化碳(CO_2)及水蒸氣之選擇性透過特性，使果實在密封或半密封狀態下，因呼吸作用消耗 O_2並釋放 CO_2，逐漸建立一個有利於品質保持的平衡氣體環境。對荔枝而言，適度降低 O_2濃度可減緩呼吸代謝與氧化反應，適量提升 CO_2則有助於抑制褐變相關酵素活性與部分微生物生長；同時，包裝內高濕環境可減少蒸散失水，降低果皮乾縮與褐化風險。

Tian 等人(2005)在'Heiye'荔枝研究中指出，聚乙烯袋形成之 MAP 條件約為 15–19% O_2與 2–4% CO_2；此條件雖可改善品質，但控制氣氛(CA)在特定組成下通常較 MAP 更能有效延緩褐變與腐敗。Passafiume et al. (2023)利用荔枝(cv. Kwai Mai)果實於 5°C進行不同氣體濃度的貯藏試驗，其利用 5% O_2 + 20% CO_2 + 75% N_2的氣體條件具有最佳的貯藏效果，有效延緩荔枝果皮褐化，並維持較佳之感官品質與食用品質。

臺灣近年荔枝產業保鮮技術應用

臺灣荔枝產期集中於每年 5 月至 7 月，採後處理流程必須講求「快速降溫、高濕保鮮與冷鏈銜接」，以降低失水、褐化與腐損風險。一般作業可分為田間採收、集貨處理、預冷、分級包裝與低溫貯運等階段。

採收時以清晨或上午為佳，此時果實田間熱較低，可減少蒸散失水。採果時通常以整個結果枝剪下，再於陰涼處進行修整與脫粒，避免陽光直射造成果皮升溫與乾燥。果

實採下後應立即置於遮陰通風處並灑水保濕，並於 3 小時內送達集貨包裝場進行後續處理，以維持最佳品質。採收過程須避免擠壓與摩擦，尤其玉荷包品種果皮突起明顯，過度堆疊容易導致機械傷與後續褐化。進入集貨場後，果實先進行灑水清洗以去除灰塵並補充表面水分，隨後進行選別與初級分級，剔除裂果、病果與過熟果。集貨場環境需保持遮陰、高濕與良好通風，理想狀態下設置低溫作業區，使分級、包裝與預冷皆在降溫環境中完成，以避免果實回溫。

預冷是荔枝採後處理的關鍵步驟，目的在快速移除田間熱並降低呼吸速率。常見方式包括冰水預冷(hydrocooling)、壓差預冷(forced-air cooling)及室內風冷。實務上多先以冰水或冷水將果溫迅速降至約 10–15°C，再轉入 5°C 冷藏庫暫存。壓差預冷約 30–40 分鐘即可有效降溫，但須維持高空氣濕度，以防果皮失水。完成預冷後，果實應立即於 10–15°C 之低溫包裝區進行包裝，避免冷鏈中斷。貯藏與運輸階段建議維持 4–5°C、相對濕度 90–95%，可有效延緩果皮褐化與病害發生。荔枝對乙烯敏感，運輸時應避免與高乙烯作物混櫃。裝櫃與配送過程必須全程維持冷鏈，避免溫度劇烈波動導致凝結水與腐敗。上架販售時亦應保持 5–10°C 低溫展示，以延長櫥架壽命。

整體而言，臺灣荔枝採後處理的核心精神為「快速降溫、全程保濕、避免機械傷害與維持冷鏈連續性」。只要田間採收與集貨預冷銜接順暢，配合適當包裝與低溫高濕貯運，即可有效抑制果皮褐化與腐損，確保內銷與外銷市場的品質穩定。

結語

荔枝果皮採後褐化為一複雜且多因子交互作用之生理現象，其核心機制涵蓋細胞膜結構破壞、酵素性氧化反應、花青素降解、活性氧累積與能量代謝失衡等多重過程。綜合本文分析可知，「細胞膜完整性」為調控褐變發生的關鍵樞紐，一旦膜系統受損，將引發區室化破壞，使氧化酵素與底物接觸，進而快速啟動褐變反應。同時，抗氧化系統衰退與能量供應不足亦會形成惡性循環，加速品質劣變。在實務應用上，水分散失被確認為最主要的誘發因子，因此維持高濕環境與降低蒸散速率為採後管理的首要策略。此外，避免低溫傷害、減少機械損傷與加強病害控制，亦是延緩褐變不可或缺的措施。近年研究顯示，可食性塗層、天然抗氧化物質處理、微生物抑制技術及奈米材料應用等，皆能有效提升荔枝採後品質與貯藏壽命；而預冷與氣變包裝技術則在降低呼吸速率、抑制氧化反應及維持水分平衡方面具有顯著效果。

就臺灣產業現況而言，荔枝採後處理已逐步朝向系統化與標準化發展，以「快速降溫、高濕保鮮與全程冷鏈」為核心，結合田間管理與後端物流技術，可有效提升內外銷市場之品質穩定性。然而，面對氣候變遷與市場需求轉變，單一技術已難以全面解決褐變問題，未來應朝向多技術整合與智慧化管理發展，例如結合感測技術監控貯運環境、導入精準氣體調控系統，以及開發具多功能性之綠色保鮮材料。整體而言，荔枝果皮褐變之控制須從生理機制與實務應用雙軌並進，透過跨領域整合研究與產業鏈協同合作，方能建立兼具效率、安全與永續性的採後保鮮體系，進一步提升臺灣荔枝產業之國際競爭力與長期發展潛力。

參考文獻

農業部。2026a。農業統計年報(113 年)-作物生產。https://agrstat.moa.gov.tw/moasdweb/book/Book.aspx?bookID=1427

農業部。2026b。農產品貿易統計表-荔枝。https://agrstat.moa.gov.tw/moasdweb/inquire/TradeReport.aspx

Alemu, T. T., Intipunya, P., and Gebeyo, B. A. 2025. A comprehensive review of edible coatings for

postharvest management of fruits and vegetables: enhancing food and nutrition security. Discover Agriculture, 3(1), 190.
Chen, S., Chen, T., Lv, X., Liu, X., Hao, T., Meng, J., Cheng, S. and Chen, Q. 2026. Antifungal activity and mechanism of thymol against Colletotrichum fructicola that causes litchi anthracnose. Pesticide Biochemistry and Physiology, 106982.
Dai, L.; Wang, X.; Zhang, J.; Li, C. 2025. Application of Chitosan and Its Derivatives in Postharvest Coating Preservation of Fruits. Foods 14, 1318. https://doi.org/10.3390/foods14081318
Deshi, V., Homa, F., Ghatak, A., Aftab, M. A., Mir, H., Ozturk, B., and Siddiqui, M. W. 2022. Exogenous methyl jasmonate modulates antioxidant activities and delays pericarp browning in litchi. Physiology and Molecular Biology of Plants, 28(8), 1561-1569.
Duan, X., Liu, T., Zhang, D., Su, X., Lin, H., and Jiang, Y. 2011. Effect of pure oxygen atmosphere on antioxidant enzyme and antioxidant activity of harvested litchi fruit during storage. Food Research International, 44(7), 1905–1911. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.027
Gao, H., Li, F., Chen, X., You, Z., Wei, L., Liu, Y., Liu, P., He, M., Hong, M., Zhu, H., Duan, X., Jiang, Y., and Yun, Z. 2024a. The role of hydrogen-rich water in delaying the pulp breakdown of litchi fruit during postharvest storage. Food Chemistry, 453, 139694.
Guo, J.; Liu, D.; Lin, G.; Qiu, H.; Guo, P.; Ding, Z.; Wu, D.; Wang, J.; Lv, E. 2025. Effects of Different Litchi E-Commerce Logistics Packaging Methods on Microenvironment and Fruit Quality Variations. Foods 14, 1305. https://doi.org/10.3390/foods14081305
Guo, X., Li, Q., Luo, T., Xu, D., Zhu, D., Li, J., Han, D., Wu, Z. 2024b. Zinc Oxide Nanoparticles Treatment Maintains the Postharvest Quality of Litchi Fruit by Inducing Antioxidant Capacity. Foods 13, 3357. https://doi.org/10.3390/foods13213357
Holcroft, D. M., and Mitcham, E. J. 1996. Postharvest physiology and handling of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). Postharvest Biology and Technology, 9, 265–281.
Hu, W. R., Ji, Z. L., Liu, S. Z., and Zhang, Z. Q. 2004. Changes of pericarp color and the content of anthocyanin and flavonoids in litchi pericarp during chilling-injured temperature storage. Acta Horticulturae Sinica, 31, 723–726. (In Chinese with English abstract) https://www.ahs.ac.cn/EN/Y2004/V31/I6/723
Hu, W. R., Liu, S. Z., Zhang, Z. Q., Jiang, Y. M., and Ji, Z. L. 2006b. Reduction of chilling injury in litchi fruit by 1-MCP. Acta Horticulturae Sinica, 33(6), 1203. (In Chinese with English abstract). https://www.ahs.ac.cn/EN/Y2006/V33/I6/1203
Huang, C. C., Paull, R. E., and Wang, T. T. 2024. Litchi postharvest physiology and handling. Crop Science, 64(4), 2014-2063.
Huang, X. M.,Wang, H. C., Yuan,W. Q., Lu, J. M., Yin, J. H., Luo, S., and Huang, H. B. 2005. A study of rapid senescence of detached litchi: Roles of water loss and calcium. Postharvest Biology and Technology,36(2), 177–189. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.12.005
Jiang, X.; Lin, X.; Lin, Y.; Chen, Y.; Chen, Y.; Chen, H. 2025. Slightly Acidic Electrolyzed Water Improves the Postharvest Quality of Litchi Fruit by Regulating the Phenylpropane Pathway. Horticulturae 11, 751. https://doi.org/10.3390/horticulturae11070751
Jiang, Y. 2000. Role of anthocyanins, polyphenol oxidase and phenols in lychee pericarp browning. Journal of the Science of Food and Agriculture, 80(3), 305–310. https://doi.org/10.1002/1097-0010(200002)80:3%3C305::AID-JSFA518%3E3.0.CO;2-H
Jiang, Y., Duan, X., Joyce, D., Zhang, Z., and Li, J. 2004. Advances in understanding of enzymatic browning in harvested litchi fruit. Food Chemistry, 88, 443–446.
Joas, J., Caro, Y., Ducamp, M. N., and Reynes, M. 2005. Postharvest control of pericarp browning of litchi fruit (*Litchi chinensis* Sonn cv Kwaï Mi) by treatment with chitosan and organic acids: I. Effect of pH and pericarp dehydration. Postharvest Biology and Technology,38(2), 128–136. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.06.013
Kumar, D., Mishra, D. S., Chakraborty, B., and Kumar, P. 2013. Pericarp browning and quality management of litchi fruit by antioxidants and salicylic acid during ambient storage. Journal of food science and technology, 50(4), 797-802.
Kumar, P., Sethi, S., and Nayak, S. L. 2024. Impact of edible hydrocolloids on quality and shelf life of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) under ambient conditions. Appl. Fruit Sci. 66(3), 1119-1127.
Kumar, V., Kumari, P., Samal, I., Singh, S., Kumar, A., and Kumar, L. 2025. Efficacy, cost-effectiveness, and residue levels of fungicides for managing panicle blight, fruit blight and anthracnose diseases of litchi. Crop Protection, 107391.
Kumar,V. and Anal, A.K.D. 2021. Postharvest diseases of litchi and their management, in: Postharvest Handling and Diseases of Horticultural Produce, CRC Press, Boca Raton, pp. 231–238.
Li, D., Cheng, H., Xie, L., Luo, H., Zhang, D., Zhao, J., Jiang Y. and Gong, L. 2026a. Physicochemical properties of edible oxidized gum arabic–polylysine crosslinked films and their effects on the postharvest preservation of litchi. Postharvest Biology and Technology, 233, 114012.
Li, T., He, M., Zeng, J., Chen, Z., Hongxia, Q., Duan, X., and Jiang, Y. 2020. Choline chloride alleviates the

pericarp browning of harvested litchi fruit by inhibiting energy deficiency mediated programmed cell death. Postharvest Biology and Technology, 167, 111224. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111224

Li, X., Liu, A., and Chen, W. 2005. Studies on development and control of anthracnose of lychee fruit before and after harvest. Acta Horticulturae, 665, 409–413. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.665.51

Li, Z., He, J., Cheng, N., Wang, X., Wang, Y., Hu, Y., ... & Li, W. 2026b. Oxalic acid application preserves postharvest litchi quality by enhancing LcWRKY75-LcATP8-dependent energy supply. Postharvest Biology and Technology, 233, 114061.

Liu, A., Chen, W., and Li, X. 2005. Changes in the postharvest physiology and lychee fruits latently infected by anthracnose fungus and the biological characteristic of the pathogenic fungus of the disease. Acta Horticulturae, 665, 365–372. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.665.45

Liu, G., Liu, S., Liu, J., Xiang, Y., Zhu, L., Xu, X., and Zhang, Z. 2025. Trehalose delays postharvest browning of litchi fruit by regulating antioxidant capacity, anthocyanin synthesis and energy status. Postharvest Biology and Technology, 219, 113249

Liu, H., Song, L., You, Y., Li, Y., Duan, X., Jiang, Y., Joyce, D. C., Ashraf, M., and Lu, W. 2011. Cold storage duration affects litchi fruit quality, membrane permeability, enzyme activities and energy charge during shelf time at ambient temperature. Postharvest Biology and Technology, 60(1), 24–30. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.11.008

Marboh, E. S., Singh, S. K., Pandey, S., Nath, V., Gupta, A. K., and Pongener, A. 2017. Fruit cracking in litchi (*Litchi chinensis*): An overview. Indian Journal of Agricultural Sciences, 87, 3–11.

Nokthai, P., Lee, V.S., and Shank, L. 2010. Molecular modeling of peroxidase and polyphenol oxidase; substrate specificity and active site comparison. International Journal of Molecular Sciences 11, 3266-3276.

Passafiume, R.; Roppolo, P.; Tinebra, I.; Pirrone, A.; Gaglio, R.; Palazzolo, E.; Farina, V. 2023. Reduction of pericarp browning and microbial spoilage on litchi fruits in modified atmosphere packaging. Horticulturae, 9(6), 651.

Rudnucki, R.M., Nowak, J., and Goszczynska, D.M. 1991. Cold storage and transportation conditions for cut flowers cutting and potted plants. Acta Horticulturae 298, 225-230.

Sun, J., Jiang, Y., Shi, J., Wei, X., Xue, S. J., Shi, J., and Yi, C. 2010. Antioxidant activities and contents of polyphenol oxidase substrates from pericarp tissues of litchi fruit. Food Chemistry, 119(2), 753–757. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.025

Tian, S. P., Li, B. Q., Xu, Y., and Hu, Z. H. 2005. Effects of O_2 and CO_2 concentrations on physiology and quality of litchi fruit in storage. Food Chemistry, 91(4), 659–666.

Underhill, S. J., and Simons, D. H. 1993. Lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) pericarp desiccation and the importance of postharvest microcracking. Scientia Horticulturae, 54(4), 287–294. https://doi.org/10.1016/0304-4238(93)90107-2

Underhill, S. J., Bagshaw, J., Prasad, A., Zauberman, G., Ronen, R., and Fuchs, Y. 1992. The control of lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) postharvest skin browning using sulphur dioxide and low pH. Acta Horticulturae, 321, 732–741. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.321.92

Vilasachandran, T.,&Sargent, S.A. (1997). Postharvest quality of lychee fruit: Role of relative humidity and panicle. HortScience, 32, 433-433. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.32.3.433D

Wang, C. Y., Chen, H., Jin, P., and Gao, H. 2010. Maintaining quality of litchi fruit with acidified calcium sulfate. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58(15), 8658–8666. https://doi.org/10.1021/jf100607e

Wang, J., Wang, X., Xu, B., and Jin, Z. 2010. Physiological changes during the process of pericarp browning in the postharvest litchi. Agricultural Science & Technology-Hunan, 11(5), 10–16. https://www.cabdirect.org/cabdirect/FullTextPDF/2010/20103342789.pdf

Xiao, L., Li, T., Jiang, G., John, A., Zhang, D., Jin,W., Duan, X.,and Jiang,Y. 2019. Effects of dry fog humidification on pericarp browning and quality of litchi fruit stored at low temperature. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 12(4), 192–196. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191204.4420

Xie, J., Qin, Z., Pan, J., Li, J., Li, X., Khoo, H. E., & Dong, X. 2022. Melatonin treatment improves postharvest quality and regulates reactive oxygen species metabolism in "Feizixiao" litchi based on principal component analysis. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 965345.

Xu, S., Lu, H., & Sun, X. (2020). Quality detection of postharvest litchi based on electronic nose: A feasible way for litchi fruit supervision during circulation process. HortScience, 55(4), 476–482. https://doi.org/10.21273/HORTSCI14750-19

Yang, C.; Lee, F. W.; Cheng, Y. J.; Chu, Y. Y.; Chen, C. N.; Kuan, Y. C. 2023. Chitosan coating formulated with citric acid and pomelo extract retards pericarp browning and fungal decay to extend shelf life of cold-stored lychee. Scientia Horticulturae 310, 111735.

Yang, Q., Shi, D., Ren, Y., Yang, C., Qu, H., Jiang, Y., & Li, T. 2024. Vitexin is a potential postharvest treatment for ameliorating litchi fruit pericarp browning by regulating autophagy. Postharvest Biology and

Technology, 216, 113061.
Yang, S., Feng, L., Yang, E., Chen, Y., Dong, X., Su, X., & Jiang, Y. 2011. Lipofuscin-Like substance involved in pericarp browning of postharvest litchi fruit during storage. The Open Food Science Journal, 5(1), 47–50. https://doi.org/10.2174/1874256401105010047
Yu, Y., Zhou, J., Chen, Q., Xie, F., Zhang, D., He, Z., Cheng, S. and Cai, J. 2024. Self-reinforced multifunctional starch nanocomposite film for litchi fruit postharvest preservation. Chemical Engineering Journal, 486, 150262.
Yun, Z., Qu, H.,Wang, H., Zhu, F., Zhang, Z., Duan, X., Yang, B., Chen, Y., and Jiang, Y. 2016. Comparative transcriptome and metabolome provide new insights into the regulatory mechanisms of accelerated senescence in litchi fruit after cold storage. Scientific Reports, 6(1),1–16. https://doi.org/10.1038/srep19356
Zeng, Z., Wang, J., Lu, H., Deng, Z., Liu, D., Guo, P., Ding, Z., Lü, E., and Guo, J. 2026. Effect of Different Pre-Cooling Methods on the Quality of Litchi During Cold Storage. Agronomy 16, 428. https://doi.org/10.3390/agronomy16040428
Zhang, Z. Q., Pang, X. Q., Duan, X. W., and Ji, Z. L. 2003. The anthocyanin degradation and anthocyanase activity during the pericarp browning of lychee fruit. Scientia Agricultura Sinica, 36(8), 945- 949. (In Chinese with English abstract). https://www.chinaagrisci.com/CN/Y2003/V36/I8/945
Zhang, Z., Hu, M., Yun, Z., Wang, J., Feng, G., Gao, Z., Shi, X., and Jiang, Y. 2017. Effect of tea seed oil treatment on browning of litchi fruit in relation to energy status and metabolism. Postharvest Biology and Technology, 132, 97–104. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.05.010
Zhang, Z., Huber, D. J., Qu, H., Yun, Z. E.,Wang, H., Huang, Z., Huang, H., and Jiang, Y. 2015. Enzymatic browning and antioxidant activities in harvested litchi fruit as influenced by apple polyphenols. Food Chemistry, 171, 191–199. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.001
Zhang, Z., Pang, X., Ji, Z.,and Jiang,Y. 2001. Role of anthocyanin degradation in litchi pericarp browning. Food Chemistry, 75(2), 217–221. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00202-3
Zhang, Z., Pang, X., Xuewu, D., Ji, Z., and Jiang, Y. 2005. Role of peroxidase in anthocyanin degradation in litchi fruit pericarp. Food Chemistry, 90(1–2), 47–52. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.03.023
Zheng, X., Lai, K., Han, X., Deng, C., Wu, W., Chen, Z.,Liu, T. and Wang, Q. 2026. Physically crosslinked sodium carboxymethyl cellulose/chitosan antifungal coating for litchi preservation. International Journal of Biological Macromolecules, 151167.
Zhou, Y., Chen, Z., He, M., Gao, H., Zhu, H., Yun, Z., Qu, H., and Jiang, Y. 2020. Unveiling the complexity of the litchi transcriptome and pericarp browning by single-molecule long-read sequencing. Postharvest Biology and Technology, 168, 111252. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111252
Zhu, D.; Luo, T.; Guo, X.; Li, J.; Li, Q.; Chen, Y.; Ou, W.; Han, D.; Wu, Z. 2025. Ethephon Treatment Enhanced Postharvest Litchi Fruit Resistance to Peronophythora litchii by Strengthening Antioxidant Capacity and Defense Systems. Foods 14, 3493. https://doi.org/10.3390/foods14203493

Physiological Mechanisms and Inhibition Strategies of Postharvest Pericarp Browning in Litchi: A Review of Recent Advances

Kuo-Dung Chiou[1,3], Min-Chi Hsu[2], Pei-ju Lin[1] and Yu-Shen Liang[3,*]

[1] Fengshan Tropical Horticultural Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Ministry of Agriculture
[2] Taiwan Agricultural Research Institute, Ministry of Agriculture
[3] Department of Plant Industry, National Pingtung University of Science and Technology,
[*] Correspondence: justinliang@mail.npust.edu.tw

Abstract

Litchi (*Litchi chinensis*) is an important economic fruit crop in Taiwan; however, rapid pericarp browning after harvest severely reduces its market value and export competitiveness. This article reviews recent studies on the physiological mechanisms and control strategies of litchi pericarp browning. Browning is essentially an enzymatic oxidation process mainly catalyzed by polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD), which oxidize phenolic compounds into quinones that subsequently polymerize into brown pigments. This process is closely associated with the loss of cell membrane integrity. Postharvest water loss, chilling injury, and senescence can damage membrane structure, leading to the loss of cellular compartmentalization and allowing enzymes to interact with their substrates, thereby initiating browning reactions. In addition, anthocyanin degradation, accumulation of reactive oxygen species (ROS), and decline in antioxidant capacity further accelerate browning, while imbalance in energy metabolism exacerbates cellular deterioration. The main factors inducing browning include water loss, senescence, low-temperature injury, mechanical damage, and pathogen infection, which interact synergistically. Recent preservation technologies focus on maintaining membrane stability, including edible coatings, chemical treatments (e.g., salicylic acid and oxalic acid), precooling, and modified atmosphere packaging (MAP), all of which effectively delay browning and maintain fruit quality. In Taiwan, practical postharvest handling emphasizes rapid precooling, high-humidity storage, and cold chain integration to ensure quality stability. Future research should integrate physiological insights with industrial applications to develop safer, more efficient, and sustainable postharvest preservation technologies for litchi.

Keywords: pericarp browning, water loss, polyphenol oxidase, reactive oxygen species, membrane integrity, modified atmosphere packaging, postharvest preservation.